



Dorobek Katedry Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w zakresie automatyzacji procesów przeróbki węgla kamiennego

Joachim PIELOT

¹⁾ dr hab.inż.; Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Akademicka 2, Gliwice, Polska; email: joachim.pielot@polsl.pl

DOI: 10.29227/IM-2017-02-03

Streszczenie

Przedstawione została działalność naukowo-badawcza Katedry Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej w zakresie automatyzacji procesów przeróbki surowców mineralnych, głównie węgla kamiennego. Badania te dotyczyły metod pomiarowych parametrów jakościowych i ilościowych węgla oraz innych wielkości procesowych, modeli symulacyjnych i ich wykorzystania w optymalizacji wartości produkcji, automatycznej regulacji procesów wzbogacania węgla w cieczach ciężkich, w osadzarce i procesu flotacji węgla, analizy wrażliwości parametrów decyzyjnych układu sterowania, monitoringu przebiegu procesów technologicznych, określania ekonomicznych efektów wzbogacania.

Słowa kluczowe: automatyzacja wzbogacania węgla, identyfikacja, model, system sterowania, predykcja, optymalizacja produkcji, gęstościomierz radiometryczny, cyfrowe przetwarzanie sygnału, flotacja węgla

Działalność naukowo-badawcza Katedry Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej (do 31.08.2017 roku Katedry Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa) od lat 50. ubiegłego wieku koncentrowała się na wielu zagadnieniach związanych z automatyką i elektryką w górnictwie. W dziedzinie automatyki wiodący zakres zagadnień dotyczy szeroko rozumianej automatyzacji procesów przeróbki surowców mineralnych, głównie węgla kamiennego. Zagadnieniami tymi zajmowało się kilkunastu pracowników, począwszy od profesorów: Anny Walaszek-Babiszewskiej, Stanisława Cierpisza i Krystiana Kalinowskiego, którzy zainspirowali młodszych kolegów tematyką badawczą. Pracownicy Katedry byli kierownikami i wykonawcami kilkunastu projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych oraz Ministerstwa Nauki. Wyniki prac zaprezentowane zostały w kilkunastu monografiach, książkach i skryptach, ponad stu artykułach publikowanych w czasopiśmie zagranicznych i krajowych, w tym również z listy JCR, oraz bardzo wielu referatach prezentowanych na konferencjach międzynarodowych i krajowych, w tym również indeksowanych w bazie Web of Science.

Z zagadnień automatyzacji przeróbki węgla kamiennego stopień doktora habilitowanego, będąc pracownikami Katedry, uzyskali (w porządku chronologicznym): Krystian Kalinowski, Anna Walaszek-Babiszewska, Roman Kaula i Joachim Pielot; na ukończeniu jest wszczęcie przewodu habilitacyjnego Adama Heyduka. Pracę doktorską z zakresu automatyzacji przeróbki surowców mineralnych obronili: Anna Walaszek-Babiszewska, Edward Jachnik, ś.p. Władysław Zapała, Roman Kaula, Joachim Pielot, Jarosław Joostberens, Agnieszka Kowal-Gornig, na ukończeniu jest dysertacja Wojciecha Pieluchy. Powstało szereg prac magisterskiej z zakresu automatyzacji procesów przeróbki węgla kamiennego.

Tematyka prac badawczych

Metody pomiarowe

Powstały prace opisujące metody pomiarowe parametrów jakościowych węgla oraz innych wielkości procesowych i ich wykorzystanie w sterowaniu procesów. W ostatnim czasie prace ukierunkowane są na zagadnienie cyfrowego przetwarzania sygnału z czujników stosowanych do pomiaru sygnałów istotnych

z punktu widzenia sterowania procesów wzbogacania węgla, w szczególności zaś mierników radiometrycznych, przeznaczonych do monitorowania parametrów ilościowych i jakościowych węgla. Prace te skupiają się na opracowaniu odpowiednich filtrów cyfrowych i – co niezwykle istotne – metod doboru ich parametrów. Na uwagę zasługują tu metody doboru parametrów filtrów FIR i IIR bazujące na wyznaczonym przebiegu sygnału referencyjnego, metoda doboru parametrów filtra predykcyjnego, czy też filtry adaptacyjne o wartościach parametrów zależnych od wartości pochodnej sygnału mierzonego. Wykorzystana została również logika rozmyta w układach odczytu sygnału wyjściowego z popiołomierza radiometrycznego. Zastosowanie tej logiki do wyboru filtrów wygładzających umożliwiło znaczne skrócenie czasu działania przy dużych zmianach sygnału wejściowego, zapewniając jednocześnie dobre wygładzenie sygnału wyjściowego w stanach ustalonych. Podjęte zostały problemy oceny błędów pomiarowych popiołomierzy. Szczególna uwaga została poświęcona kwestii wpływu błędów stosowanych metod pomiarowych na dokładność identyfikacji modeli kinetyki flotacji cyklicznej.

Prowadzone są badania dotyczące wykorzystania analizy obrazów do oceny składu ziarnowego surowców mineralnych, ze szczególnym uwzględnieniem węgla kamiennego. W przypadku węgla kamiennego zadanie to jest znacznie trudniejsze niż w przypadku innych surowców mineralnych z uwagi na czarny kolor i lekki połysk węgla, komplikujące uzyskanie odpowiednio wyraźnych obrazów; zakres badań był ograniczony do obrazów w skali szarości. Opracowano i przetestowano na stanowisku badawczym wyspecjalizowane algorytmy segmentacji obrazu oparte na metodach aproksymacji średniokwadratowej i geometrii różniczkowej oraz metody niesegmentacyjne, wykorzystujące funkcje przestrzennej autokorelacji obrazu oraz jej aproksymacje z funkcji autokorelacji wzorcowych klas ziarnowych trzema metodami: stereowizją, triangulacją laserową i pomiaru czasu przelotu sygnału.

Działalność naukowo-badawcza Katedry Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej (do 31.08.2017 roku Katedry Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa) od lat 50. ubiegłego wieku koncentrowała się na wielu zagadnieniach związanych z automa-

tyką i elektryką w górnictwie. W dziedzinie automatyki wiodący zakres zagadnień dotyczy szeroko rozumianej automatyzacji procesów przeróbki surowców mineralnych, głównie węgla kamiennego. Zagadnieniami tymi zajmowało się kilkunastu pracowników, począwszy od profesorów: Anny Walaszek-Babiszewskiej, Stanisława Cierpisza i Krystiana Kalinowskiego, którzy zainspirowali młodszych kolegów tematyką badawczą. Pracownicy Katedry byli kierownikami i wykonawcami kilkunastu projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych oraz Ministerstwa Nauki. Wyniki prac zaprezentowane zostały w kilkunastu monografiach, książkach i skryptach, ponad stu artykułach publikowanych w czasopiśmie zagranicznych i krajowych, w tym również z listy JCR, oraz bardzo wielu referatach prezentowanych na konferencjach międzynarodowych i krajowych, w tym również indeksowanych w bazie Web of Science.

Z zagadnień automatyzacji przeróbki węgla kamiennego stopień doktora habilitowanego, będąc pracownikami Katedry, uzyskali (w porządku chronologicznym): Krystian Kalinowski, Anna Walaszek-Babiszewska, Roman Kaula i Joachim Pielot; na ukończeniu jest wszczęcie przewodu habilitacyjnego Adama Heyduka. Pracę doktorską z zakresu automatyzacji przeróbki surowców mineralnych obronili: Anna Walaszek-Babiszewska, Edward Jachnik, ś.p. Władysław Zapała, Roman Kaula, Joachim Pielot, Jarosław Joostberens, Agnieszka Kowal-Gornig, na ukończeniu jest dysertacja Wojciecha Pieluchy. Powstało szereg prac magisterskiej z zakresu automatyzacji procesów przeróbki węgla kamiennego.

Tematyka prac badawczych

Metody pomiarowe

Powstały prace opisujące metody pomiarowe parametrów jakościowych węgla oraz innych wielkości procesowych i ich wykorzystanie w sterowaniu procesów. W ostatnim czasie prace ukierunkowane są na zagadnienie cyfrowego przetwarzania sygnału z czujników stosowanych do pomiaru sygnałów istotnych z punktu widzenia sterowania procesów wzbogacania węgla, w szczególności zaś mierników radiometrycznych, przeznaczonych do monitorowania parametrów ilościowych i jakościowych węgla. Prace te skupiają się na opracowaniu odpowiednich filtrów cyfrowych i – co niezwykle istotne – metod doboru ich parametrów. Na uwagę zasługują tu metody doboru parametrów filtrów FIR i IIR bazujące na wyznaczonym przebiegu sygnału referencyjnego, metoda doboru parametrów filtru predykcyjnego, czy też filtry adaptacyjne o wartościach parametrów zależnych od wartości pochodnej sygnału mierzonego. Wykorzystana została również logika rozmyta w układach odczytu sygnału wyjściowego z popiołomierza radiometrycznego. Zastosowanie tej logiki do wyboru filtrów wygładzających umożliwia znaczne skrócenie czasu działania przy dużych zmianach sygnału wejściowego, zapewniając jednocześnie dobre wygładzenie sygnału wyjściowego w stanach ustalonych. Podjęte zostały problemy oceny błędów pomiarowych popiołomierzy. Szczególna uwaga została poświęcona kwestii wpływu błędów stosowanych metod pomiarowych na dokładność identyfikacji modeli kinetyki flotacji cyklicznej.

Prowadzone są badania dotyczące wykorzystania analizy obrazów do oceny składu ziarnowego surowców mineralnych, ze szczególnym uwzględnieniem węgla kamiennego. W przypadku węgla kamiennego zadanie to jest znacznie trudniejsze niż w przypadku innych surowców mineralnych z uwagi na czarny kolor i lekki połysk węgla, komplikujące uzyskanie odpowiednio wyraźnych obrazów; zakres badań był ograniczony do obrazów w skali szarości. Opracowano i przetestowano na stanowisku badawczym wyspecjalizowane algorytmy segmentacji obrazu oparte na metodach aproksymacji średniokwadratowej i geometrii różniczkowej oraz metody niesegmentacyjne, wykorzystujące funkcje przestrzennej autokorelacji obrazu oraz jej aprok-

symacje z funkcji autokorelacji wzorcowych klas ziarnowych trzema metodami: stereowizją, triangulacją laserową i pomiaru czasu przelotu sygnału. Proces wzbogacania w osadzarkach pulsacyjnych jest silnie wrażliwy na zmiany składu ziarnowego nadawy, a czas przejścia całego strumienia materiału przez łożo osadzarki aż do punktu umożliwiającego pomiar charakterystyk koncentratu na wyjściu osadzarki jest stosunkowo długi. Z tego względu w oparciu o modele symulacyjne uzasadniona została ekonomiczna efektywność stosowania szybkiej analizy wizyjnej w układach sterowania pracą maszyn i urządzeń przerobczych. Prace w tym zakresie koncentrowały się na doborze gęstości rozdziału w układach z jedną lub kilkoma osadzarkami, pracującymi w warunkach częstych zmian składu ziarnowego nadawy.

Modele symulacyjne i ich wykorzystanie w optymalizacji wartości produkcji

Prowadzone były przez wiele lat prace, dotyczące identyfikacji procesów wzbogacania grawitacyjnego w cieczach ciężkich i osadzarkach oraz we flotownikach wielokomorowych, modeli stochastycznych opróbowania węgla, modeli symulacyjnych (statycznych i dynamicznych) procesów przerobczych i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla. Opracowano algorytmy sterowania procesu wzbogacania węgla z wykorzystaniem pomiaru rozkładu frakcji densymetrycznych w łożu osadzarki. Zastosowano też metody klasyfikacji danych w analizie jakości węgla.

Wiele prac dotyczyło zagadnień optymalnego doboru parametrów rozdziału w układach technologicznych przeróbki węgla – opracowana została metoda wyznaczania optymalnych wartości parametrów rozdziału procesów przerobczych. Zajmowano się również optymalną strukturą sterowań układów technologicznych przeróbki węgla i w tym zakresie opracowana została metoda doboru optymalnej struktury sterowań.

W zakresie optymalizacji wartości produkcji podjęta została problematyka związana ze zmiennością parametrów nadawy, różną konfiguracją grup wzbogacalników grawitacyjnych dwu-produktowych (z uwzględnieniem wielokryterialnej optymalizacji produkcji) oraz flotowników. Poddano analizie wzbogacanie węgla z recykulacją produktów we wzbogacalnikach grawitacyjnych, głównie w osadzarkach i cyklonach wzbogacających, oraz flotownikach. Rozpatrywane były przypadki różnych układów technologicznych, w których można wykorzystać osadzarki.

Wzbogacanie flotacyjne jest procesem złożonym ze względu na wpływ wielu czynników. W ujęciu makroskopowym przyjmuje się, że wielkością, która uwzględnia wpływ wszystkich istotnych czynników na proces wzbogacania jest współczynnik prędkości flotacji ziaren. W praktyce przemysłowej do procesu flotacji kieruje się materiał niejednorodny pod względem właściwości flotacyjnych. W związku z tym współczynnik prędkości flotacji charakteryzuje się pewnym rozkładem. Nadawę można zatem opisać funkcją gęstości rozkładu flotowalności ziaren. Charakterystyki rozkładu frakcji nadawy do flotacji wyznaczane są, w oparciu o przebieg kinetyki wydzielania się masy koncentratu i popiołu. Tematem wielu prac były badania dotyczące wyznaczania parametrów modelu kinetyki flotacji węgla, charakterystyk statycznych jednokomorowego i wielokomorowego flotownika przepływowego, a także zagadnień optymalizacji statycznej układu połączeń wielokomorowych maszyn flotacyjnych.

Analizowana była produkcja całej grupy zakładów wzbogacania węgla w warunkach zmiennej jakości wydobywanego węgla surowego. Prowadzone były badania nad sterowaniem i optymalizacją produkcji grupy zakładów przeróbki węgla z uwzględnieniem odpowiednio określonych ograniczeń.

Automatyczna regulacja procesów

Prace w zakresie automatycznej regulacji procesów dotyczyły wzbogacania węgla w cieczach ciężkich, w osadzarce,

procesu flotacji węgla, jako złożonego, nieliniowego, dynamicznego obiektu sterowania o wielu wejściach i wielu wyjściach, oraz wielowariantowych sposobów produkcji mieszanek i stabilizacji ich parametrów. Przeprowadzone były analizy i syntezy układów regulacji procesów przeróbki węgla, zagadnienia regulacji ekstremalnej w produkcji koncentratów węgla i mieszanek węgla (z regulowanym przepływem jednego lub kilku składników, uwzględniające zakłócenia w układach sterowania), jak i analizy odpadów przy takiej regulacji. Prowadzone były badania związane ze sterowaniem nieliniowego procesu produkcji mieszanek węglowych z wykorzystaniem metod linearyzacji i odsprężania.

Szczególnie trudne w praktyce przemysłowej jest poprawne sterowanie procesem wzbogacania w osadzarkach i flotownikach. Te zagadnienia zostały scharakteryzowane w publikacjach pracowników Katedry. Przykładowo badany jest wpływ zastosowania różnych metod kompensacji zjawiska windup na dynamiczne efekty sterowania, przy zachowaniu odpowiedniej jakości koncentratu.

W większości krajowych systemów sterowania procesu flotacji węgla dostępny jest ciągły pomiar parametrów ilościowych nadawy oraz parametru jakościowego odpadów, a strategia sterowania opiera się głównie na wiedzy operatora procesu, który podejmuje decyzje o zmianach wartości sygnałów sterujących (w tym głównie ilości odczynnika flotacyjnego) na podstawie obserwacji wskazań gęstościomierza nadawy i popiołomierza odpadów. W oparciu o wyniki przeprowadzonych identyfikacyjnych badań przemysłowych opracowany został również algorytm automatycznej regulacji flotacji węgla, który umożliwi realizację przyjętego kryterium sterowania w postaci maksymalizacja wartości produkcji, przy zamknięciu pętli sprzężenia zwrotnego od zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych. Zaproponowano algorytm automatycznej regulacji ekstremalnej z wykorzystaniem modelu procesu i bazy wiedzy opartej na bazie danych zawierającej zapis optymalnych ilości odczynnika flotacyjnego dla danych parametrów nadawy, zapewniający poprawę realizacji kryterium sterowania dla niektórych obiektów przemysłowych wyposażonych w aparaturę umożliwiającą ciągły pomiar parametrów ilościowych nadawy i jakościowych odpadów flotacyjnych.

Analiza wrażliwości parametrów decyzyjnych układu sterowania

Jednym z podstawowych zadań układów regulacji procesów przeróbki węgla jest stabilizacja parametrów jakościowych na zadanym poziomie. Istotnym problemem jest wybór regulatora odpornego na różnorodne zakłócenia i dobór nastaw regulatora. Zagadnienia te były rozważane w wielu pracach.

W celu zwiększenia niezawodności sterowania obiektów o istotnych nieliniowościach, można przeprowadzić analizę zakłóceń w optymalnym lub quasi-optymalnym punkcie pracy układu. Efektywnym narzędziem jest analiza wrażliwości parametrów decyzyjnych układu sterowania procesów przeróbki węgla. Przedmiotem wielu prac były rozważania dotyczące zagadnień wrażliwości, w odniesieniu do pojedynczego układu technologicznego oraz grupy układów technologicznych procesów przeróbki węgla.

Monitoring procesów

Szereg prac dotyczyło monitoringu przebiegu procesów technologicznych oraz rozwoju dyspozytorskich systemów sterowania i wizualizacji przebiegu procesów przeróbki węgla. Podjęto próby zastosowania w systemach dyspozytorskiego sterowania komputerowego modelu symulacyjnego procesów przeróbki węgla i prognozowanie efektów wzbogacania w trybie on-line.

Efekty ekonomiczne

Wykorzystując modele symulacyjne przeprowadzone zostały liczne badania dotyczące ekonomicznych efektów wzbogacania (określanych na podstawie ilości i jakości produktów wzbogacania) w pojedynczych wzbogacalnikach (analizy strat ekonomicznych wzbogacania w cieczach ciężkich przy nieprawidłowych gęstościach cieczy, wpływ zmian parametrów nadawy, dokładności wzbogacania) i w układach technologicznych złożonych z kilku wzbogacalników (w warunkach zmian parametrów nadawy, przy łącznym i odrębnym wzbogacaniu różnych węgli surowych, przy różnych formułach sprzedażnych węgla). Oceniona została wartość produkcji uzyskiwanej z węgla surowego o różnej jakości. Duży nacisk położony został na efekty ekonomiczne w układach z wielokrotnym wzbogacaniem węgla (z recykulacją i bez recykulacji produktów, zwłaszcza produktu przejściowego, z różną dokładnością wzbogacania). Ocenie poddana została wartość produkcji przy wzbogacaniu różnych klas ziarnowych węgla energetycznego w osadzarkach (pojedynczej osadzarce, w dwóch równoległych osadzarkach, w układach osadzarek), określony został wpływ zmian składu ziarnowego nadawy na efekty wzbogacania węgla w układach osadzarek. Określona została efektywność ekonomiczna zastosowania realizowanej na bieżąco analizy składu ziarnowego nadawy kierowanej do układów wzbogacania w osadzarkach.

Analizowane zostały różne formuły sprzedażne węgla energetycznego, oceniona została wartość produkcji węgla przy różnych parametrach odniesiona w tych formułach (dokonana została też analiza formuł sprzedażnych węgla energetycznego pod względem liniowości cen węgla od zawartości popiołu).

Literatura

1. Cierpisz S., 2005 – Parametry jakości węgla. Pomiary i sterowanie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 28, Gliwice.
2. Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J., 2005 – Sterowanie i optymalizacja produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, monografia nr 107.
3. Cierpisz S., Pielot J., 2001 – Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, monografia nr 28, Gliwice.
4. Cierpisz S., Joostberens J., 2016 – Monitoring of coal separation in a jig using a radiometric density meter, Measurement (Elsevier), Volume 88, June 2016, p. 147–152.

5. Cierpisz S., Joostberens J., 2016 – Monitoring of the pulsation cycle in a jig using a radiometric density meter. Mineral Engineering Conference MEC2016, Świeradów Zdrój 25 – 28.09.
6. Cierpisz S., Joostberens J., 2016 – Optimization of a Radiometric Density Meter for Monitoring of a Coal Separation Process in a Jig. 17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Vienna (Austria) 31.08.-02.09.
7. Cierpisz S., Joostberens J., 2017 – Pomiar gęstości ośrodka w osadzarce z użyciem gęstościomierza radiometrycznego z licznikiem impulsów. Inżynieria Mineralna, Volumin XVIII, Nr 2(40) 2017, str. 119-126.
8. Heyduk A., 2016 – Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis. Archives of Mining Sciences, 61, No 1, p. 15–27.
9. Heyduk A., 2017 – Metody akwizycji i przetwarzania obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych w wizyjnej analizie granulometrycznej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, monografia nr 669.
10. Heyduk A., Pielot J., 2014 – Economical efficiency assessment of an application of on line feed particle size analysis to the coal cleaning systems in jigs. Inżynieria Mineralna, nr 2 (34).
11. Joostberens J., 2014 – Identification of Dynamic Model of Coal Flotation Process on the Basis of Smoothed Step Response. Inżynieria Mineralna 2 (34) 2014, str. 229-234.
12. Kalinowski K., 2007 – Information Structures of Technological Flotation Systems. Network Integrators Associates, Parkland, Florida, USA.
13. Kalinowski K., Kaula R., 2016 – Determination of static characteristics of flow flotation machines based on experiments of the kinetics of the batch coal flotation. Archives of Mining Sciences, 61, No 1, p. 47–57.
14. Kaula R., Pielot J., 2005 – Problems of production control in coal preparation technological system. Archives of Mining Sciences, Issue 1, p. 69–100.
15. Kaula R., Pielucha W., 2015 – Wpływ parametrów modelu dynamicznego na jakość regulacji procesów wzbogacania węgla. Materiały Konferencji Automatyki Telekomunikacji Informatyki ATI, Szczyrk, 24-26.06, s. 169-177.
16. Pielot J., 2015 – An analysis of effects of coal jiggling after changes in the grain composition of a feed. Archives of Mining Sciences, 55, No. 4, p. 827-846.
17. Pielot J., 2011 – Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 306, Gliwice.
18. Zapała W., 1992 – Seminarium elektryfikacji i automatyzacji kopalń, z. 9: Technika mikroprocesorowa w automatyzacji zakładów przeróbki mechanicznej węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

Achievements of the Department of Electrical Engineering and Automatics of Silesian University of Technology in the scope of automation of hard coal processing

The paper presents a research activity of the Department of Electrical Engineering and Automation in Industry in the area of mineral processing (particularly coal preparation). This activity has been focused on measurement methods of coal qualitative and quantitative parameters and other process parameters, simulation models and their application to production value optimization, automatic control of coal preparation processes in jigs and flotation, sensitivity analysis of control system decision parameters, technological process monitoring and estimation of economical effects of mineral processing.

Keywords: coal enrichment automatization, identification, model, control system, prediction, production optimization, radiometric density meter, digital signal processing, coal flotation process